

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«НАЦІОНАЛЬНИЙ ГІРНИЧИЙ УНІВЕРСИТЕТ»

Левчук Ігор Леонідович

УДК 621.357.7

**ОПТИМАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ КАТАЛІТИЧНОГО
РИФОРМІНГУ ПРИ ОТРИМАННІ ВИСОКООКТАНОВОГО
КОМПОНЕНТА БЕНЗИНУ**

Спеціальність 05.13.07 – «Автоматизація процесів керування»

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Дніпропетровськ – 2013

Дисертація є рукописом.

Робота виконана на кафедрі комп'ютерно-інтегрованих технологій і метрології Державного ВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет» (м. Дніпропетровськ) Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент
Тришкін Владислав Якович,
доцент кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій і метрології Державного ВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет» (м. Дніпропетровськ) Міністерства освіти і науки України.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Поркуян Ольга Вікторівна,
директор Технологічного інституту Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля (м. Сєверодонецьк) Міністерства освіти і науки України;

доктор технічних наук, професор
Головко В'ячеслав Ілліч, професор
кафедри автоматизації виробничих процесів
Національної металургійної академії України
(м. Дніпропетровськ) Міністерства освіти і науки України.

Захист дисертації відбудеться **«14» листопада 2013 р. о 14:30** годин на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.080.07 при Державному вищому навчальному закладі «Національний гірничий університет» Міністерства освіти і науки України за адресою: 49027, м. Дніпропетровськ, просп. К. Маркса 19.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Державного вищого навчального закладу «Національний гірничий університет» Міністерства освіти і науки України за адресою: 49027, м. Дніпропетровськ, просп. К. Маркса 19.

Автореферат розісланий **«11» жовтня 2013 р.**

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради Д 08.080.07,
кандидат технічних наук, доцент

О.В. Остапчук

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Виробництво нафтопродуктів - важлива галузь промисловості України, яка значною мірою впливає на економічний розвиток нашої країни. Бензини - один з основних видів палива для двигунів сучасної техніки. Ароматичні вуглеводні (бензол, толуол, ксилоли) повсюдно використовуються у виробництві пластичних мас, синтетичних каучуків, синтетичних волокон і розчинників. Процес каталітичного риформінгу є важливою стадією отримання високооктанового компонента автомобільних бензинів, ароматичних вуглеводнів та технічного водню. Продуктивність установок каталітичного риформінгу значною мірою залежить від ефективності керування даним процесом.

Проблемам розробки систем оптимального керування процесом каталітичного риформінгу, що базуються на математичних моделях, присвячена достатня кількість досліджень і публікацій, серед яких можна виділити роботи таких вчених, як J. Crane, J.M. Smith, Ю.М. Жоров, С.А. Ахметов, Г.Н. Семенцов, О.В. Поркуян, В.І. Головка, В.В. Ткачов та ін.

Існуючі системи оптимального керування використовують математичні моделі, що описують процес інформаційно, за принципом «чорного ящика», або кінетичні моделі, які відображають кінетику хімічного перетворення вуглеводнів в реакторному блоці. Перші поступаються формальним моделям за мірою з'ясовності отриманих результатів і не враховують тонкощі реакцій, що протікають в модельованому об'єкті, а тому швидко втрачають адекватність. Другі не враховують нестационарність описуваного об'єкта через дезактивацію каталізатора з плином часу, а також вимагають багато часу на ідентифікацію.

Таким чином, **наукова задача** дисертаційної роботи полягає у створенні системи оптимального керування процесом каталітичного риформінгу, що базується на математичній моделі, яка більш точно описує процес в порівнянні з існуючими аналогами. Задача є актуальною, оскільки її реалізація забезпечить підвищення ефективності керування процесом і призведе до зростання продуктивності, а також техніко-економічних показників установок каталітичного риформінгу.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Обраний напрямок досліджень є складовою частиною тематичного плану науково-дослідних робіт ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет» на тему «Розробка теоретичних засад та створення енергоресурсозберігаючих АСКТП» (номер держреєстрації 0106U003421) і «Розробка та дослідження комп'ютерно-інтегрованих систем управління (КІСУ)» (номер держреєстрації 0111U008143), над якими здобувач працював як відповідальний виконавець.

Мета і завдання дослідження. Мета дисертаційної роботи - збільшення продуктивності установки каталітичного риформінгу шляхом створення і реалізації системи оптимального керування на базі уточненої кінетичної моделі.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- розробити математичну модель процесу каталітичного риформінгу, переважаючи відомі аналоги за точністю розрахунку основних вихідних параметрів процесу і придатну для використання в системах оптимального керування;
- передбачити в математичній моделі механізм компенсації нестационарності процесу каталітичного риформінгу внаслідок зміни активності каталізатора з плином часу;
- розробити спосіб ідентифікації, що дозволяє мінімізувати час пошуку настроювальних коефіцієнтів без зниження адекватності математичної моделі каталітичного риформінгу;
- обрати основні керуючі впливи і методами імітаційного моделювання дослідити чутливість вихідних показників процесу каталітичного риформінгу по каналу керування;
- обрати критерій оптимізації процесу, виходячи з економічного аналізу функціонування установок каталітичного риформінгу
- провести дослідження оптимальних режимів та розробити спосіб оптимального керування процесом каталітичного риформінгу на базі математичної моделі у відповідності з обраним критерієм оптимальності;
- розробити функціональну структуру і вибрати технічні засоби для реалізації системи оптимального керування процесом каталітичного риформінгу;
- розробити алгоритмічне та програмне забезпечення для реалізації системи оптимального керування процесом каталітичного риформінгу, адаптоване для інтеграції в сучасні SCADA системи.

Об'єкт дослідження – керування процесом каталітичного риформінгу бензинів в каскаді реакторів.

Предмет дослідження – методи оптимального керування процесом каталітичного риформінгу на базі математичної моделі.

Методи досліджень. Методи математичного моделювання для побудови математичної моделі; метод Рунге-Кутта-Мерсона для чисельного рішення диференціальних рівнянь; ітераційний метод порозрядного наближення з зміною напрямку пошуку і апарат нейронних мереж на етапі ідентифікації математичної моделі; методи імітаційного моделювання для дослідження процесу і оцінки адекватності математичної моделі; метод нелінійної оптимізації Хука-Дживса для вирішення задачі оптимізації.

Наукові положення, які виносяться на захист.

1. В рівняння для розрахунку констант швидкостей хімічних реакцій введені коригувальні множники, які компенсують різну активність каталізатора в реакторах і таким чином збільшують адекватність математичної моделі каталітичного риформінгу.

2. Чутливість каналів керування «вихід ароматичних вуглеводнів - температура суміші на вході» реакторів дозволяє визначити оптимальний розподіл температур на входах реакторного блоку і таким чином знизити швидкість дезактивації каталізатора.

Наукові результати та їх новизна.

1. Вперше математична модель реакторного блоку каталітичного риформінгу реалізована у вигляді системи кінетичних моделей з індивідуальними настроювальними коефіцієнтами, які враховують властивості реакційної суміші і активність каталізатора в кожному реакторі та збільшують адекватність математичного опису процесу.

2. Вперше розроблено ітераційно-нейромережевий спосіб ідентифікації, що мінімізує час пошуку настроювальних коефіцієнтів математичної моделі процесу каталітичного риформінгу за рахунок використання нейронної мережі для компенсації кроків пошукового ітераційного алгоритму.

3. Вперше розроблено спосіб розрахунку оптимального розподілу температур реакційної суміші на входах реакторного блоку каталітичного риформінгу в залежності від ароматизації сировини та чутливості процесу за каналом керування температурою.

4. Розроблений спосіб керування процесом каталітичного риформінгу шляхом оптимального розподілу температур на входах першого і другого реакторів при постійному граничному значенні решти керуючих впливів.

Практичне значення одержаних результатів.

1. Розроблено спеціальне математичне, алгоритмічне і програмне забезпечення системи оптимального керування процесом каталітичного риформінгу, адаптоване для інтеграції в сучасні SCADA системи і придатне до використання в існуючих АСКТП каталітичного риформінгу.

2. Запропонована в роботі технічна реалізація системи оптимального керування процесом каталітичного риформінгу, що базується на математичній моделі, придатна до використання на нафтопереробних підприємствах при створенні і модернізації існуючих АСК даним процесом.

3. Система оптимального керування процесом каталітичного риформінгу пройшла дослідно-промислові випробування і передана в експлуатацію на ПАТ «ЛУКОЙЛ - Одеський НПЗ». В результаті випробувань встановлено, що використання представленої системи оптимального керування збільшує вихід кінцевого продукту - каталізата на 3-5%, що підтверджено відповідним актом.

4. Окремі розділи дисертаційної роботи використані в навчальному процесі кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій і метрології ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет» при вивченні дисциплін «Числові методи та моделювання» і «Автоматизовані системи керування технологічними процесами» студентами III та IV курсів напряму підготовки 6.050202 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології».

Особиста участь здобувача. Основні положення і результати дисертації автором отримані самостійно.

Апробація роботи. Результати дисертаційного дослідження доповідалися, обговорювалися і були схвалені на наукових міжкафедральних семінарах Державного ВНЗ Український державний хіміко-технологічний університет та Державного ВНЗ «Національний гірничий університет».

Робота пройшла апробацію на таких конференціях: Перша міжнародна конференція студентів та аспірантів «Хімія и Сучасні технології»,

(м. Дніпропетровськ, 2003 р.); 11 міжнародна конференція «Системний аналіз та інформаційні технології» (м. Київ, 2009 р.).

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 11 друкованих праць, 8 статей у фахових виданнях України, 2 тези доповідей на міжнародних науково-технічних конференціях та один патент на винахід.

Структура і обсяг роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків по роботі, списку використаних джерел та додатків. Повний обсяг дисертації 172 сторінки, в яких основний зміст викладено на 144 сторінках друкованого тексту. Робота містить 35 рисунків та 5 таблиць, список літератури з 136 найменувань, додатки обсягом 8 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність роботи, сформульовані мета і задачі дослідження, наведений зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Викладені новизна, практична цінність і дані про апробацію отриманих результатів досліджень. Позначений особистий внесок здобувача.

У першому розділі здійснений короткий опис та виконано аналіз процесу каталітичного риформінгу як об'єкта керування. Розглянуто основні способи керування і проведено огляд основних підходів до розробки математичного опису процесу. Проаналізовано відомі критерії оптимізації процесу каталітичного риформінгу.

В результаті літературного огляду встановлено, що існуючі системи оптимального керування процесом каталітичного риформінгу базуються або на емпіричних моделях, що описують процес інформаційно та створені на основі аналізу статистичних даних конкретного об'єкта, або на кінетичних моделях, що відображають кінетику хімічного перетворення вуглеводнів в реакторному блоці риформінгу.

Використання розглянутих математичних моделей каталітичного риформінгу в системах керування не дозволяє здійснювати розрахунок оптимальних режимів процесу з високою точністю, що знижує загальну ефективність керування, продуктивність та інші техніко-економічні показники каталітичного риформування.

Зазначені обставини характеризують актуальність проблеми і є обґрунтуванням теми дисертаційного дослідження. Проведений аналіз дозволив виявити напрям дослідження і сформулювати цілі і завдання роботи.

Другий розділ присвячений створенню уточненої математичної моделі (ММ) процесу каталітичного риформінгу. У відповідності зі стратегією системного аналізу проведена декомпозиція реакторного блоку каталітичного риформінгу на більш прості для дослідження і моделювання об'єкти - окремі реактори. Розроблена нова структура математичної моделі об'єкта керування, що відрізняється від відомих тим, що математична модель процесу каталітичного риформінгу представлена у вигляді системи трьох послідовно з'єднаних кінетичних моделей окремих реакторів з індивідуальними настроювальними параметрами для кожної з них (рис. 1).

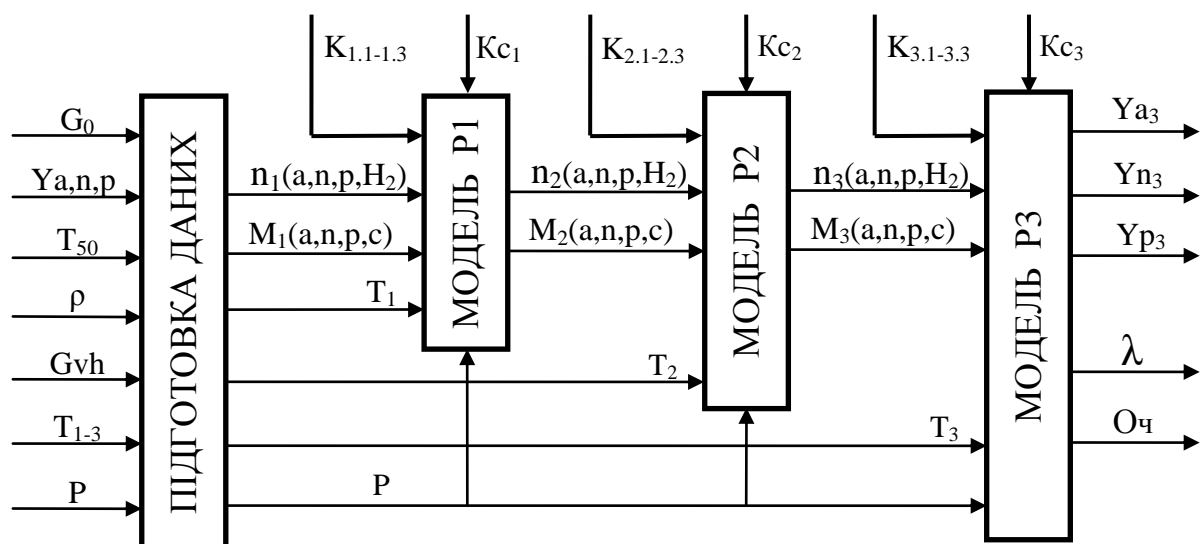


Рис. 1. Структура математичної моделі процесу каталітичного риформінгу

Вхідними параметрами моделі є: G_0 – витрата гідрогенізату на вході реакторного блоку; $Y_{a,n,p}$ – відповідно вміст ароматичних, нафтових і парафінових вуглеводнів у вхідній суміші; T_{50} – температура 50% википання вхідної суміші; ρ – щільність вхідної суміші; G_{vh} – витрата водневмісного газу на вході реакторного блоку; T_{1-3} – температури суміші на вході реакторів Р1, Р2 и Р3; P – тиск суміші на вході реакторного блоку; K, K_c – настроювальні коефіцієнти моделі.

Вихідними параметрами моделі є: Y_{a3}, Y_{n3}, Y_{p3} – вміст ароматичних, нафтових і парафінових вуглеводнів в продуктах реакції; λ – вихід кінцевого продукту - каталізата; O_c – октанове число одержуваного каталізата;

Кінетика хімічних перетворень і тепловий баланс у кожному реакторі каталітичного риформінгу описуються наступною системою рівнянь:

$$\begin{aligned}
 -\frac{dn_{na}}{dG_k} &= k_1 p_n - k_1' p_a p_{H_2}^3; \\
 -\frac{dn_{np}}{dG_k} &= k_2 p_n p_{H_2} - k_2' p_p; \\
 -\frac{dn_{ng}}{dG_k} &= k_3 \frac{p_n}{p}; \quad -\frac{dn_{pg}}{dG_k} = k_4 \frac{p_p}{p}; \\
 -\frac{dT}{dG_k} &= \frac{1}{G_{cm} \cdot \bar{C}} \cdot \sum \Delta H_j \cdot \frac{dn_j}{dG_k};
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

де G_k – маса каталізатора, кг; $dn_{na}, dn_{np}, dn_{ng}$ – кількість нафтових вуглеводнів, що перейшли в ароматичні, парафінові і газоподібні вуглеводні в елементарному шарі каталізатора dG_k , Кмоль/ч; dn_{pg} – елементарна кількість парафінових, які перейшли у газоподібні вуглеводні в елементарному шарі каталізатора dG_k , Кмоль/ч; p_a, p_n, p_p, p_{H_2} – парціальні тиски ароматичних, нафтових, парафінових вуглеводнів і водню в реакційній суміші, Па; P –

загальний тиск суміші, Па; $k_1, k_1', k_2, k_2', k_3, k_4$ - константи швидкості прямих і зворотних хімічних реакцій, що протікають в реакторі; G_{cm} - масовий потік реакційної суміші, кг/г; \bar{C} - середня теплоємність реакційної суміші, кДж/кг·К°; ΔH_j - тепловий ефект j-тої хімічної реакції, кДж/моль; dn_i - елементарна зміна i-го компонента в результаті реакції, що протікає в елементарному шарі каталізатора dG_k , Кмоль/ч.

Для компенсації нестационарності процесу внаслідок зміни активності каталізатора з часом в ході проведеного дослідження були виявлені найбільш чутливі до стану каталізатора хімічні реакції, що визначають точність кількісних оцінок параметрів процесу. У рівняння для розрахунку констант швидкостей реакцій k_1, k_1' і k_2 був введений додатковий коефіцієнт K_c , який періодично уточнюється на етапі ідентифікації при використанні математичної моделі для розрахунку оптимальних режимів. Рівняння для розрахунку констант швидкостей хімічних реакцій що входять в систему рівнянь (1), мають вигляд:

$$\begin{aligned} k_1 = K_c \cdot K_{01} \cdot e^{-\frac{E_1}{RT}} ; k_1' = K_c \cdot K'_{01} \cdot e^{-\frac{E'_1}{RT}} ; k_2 = K_c \cdot K_{02} \cdot e^{-\frac{E_2}{RT}} ; \\ k_2' = K'_{02} \cdot e^{-\frac{E'_2}{RT}} ; k_3 = K_{03} \cdot e^{-\frac{E_3}{RT}} ; k_4 = k_3 ; \end{aligned} \quad (2)$$

де K, E – передекспоненціальні множники констант швидкостей та енергії активації хімічних реакцій; T – температура реакційної суміші, °К; K_c – коригуючий множник, індивідуальний для кожного реактора.

Початкові значення передекспоненціальних множників K і енергій активації E також уточнюються на етапі ідентифікації математичної моделі, що дозволяє врахувати особливості хімічних перетворень реакційної суміші індивідуально для кожного реактора.

Важливим етапом в отриманні моделі, яка адекватно описує процес, є ідентифікація. У процесі пошуку настроювальних коефіцієнтів доводиться багаторазово (на кожному кроці) прораховувати модель. Навіть на сучасних ЕОМ це займає тривалий час і не задовольняє вимогам до сучасних АСУТП за оперативністю і якістю керування. Для мінімізації часу ідентифікації в роботі використано два підходи:

1. Хімічні перетворення в реакторах риформінгу протікають з поглинанням тепла. Величина перепаду температур реакційної суміші на вході-виході поточного реактора побічно характеризує активність каталізатора, тому функція різниці температур використовується в даній роботі для визначення напрямку пошуку (в бік зменшення або збільшення) нового значення настроювального коефіцієнта моделі:

$$F(T) = T_{iMM} - T_{iTO} \quad (3)$$

де T_{iMM} – температура суміші на виході i-го реактора, яка розрахована за математичною моделлю; T_{iTO} – температура суміші на виході i-го реактора, яка отримана з технологічного об'єкта.

2. Було прийнято рішення знизити час пошуку нового значення настроювального коефіцієнта шляхом апроксимації інформації про раніше знайдені коефіцієнти моделі та відповідні їм перепади температур за допомогою нейронної мережі (НМ) і таким чином мінімізувати кількість кроків пошукових алгоритмів і значно скоротити час ідентифікації (рис. 2).

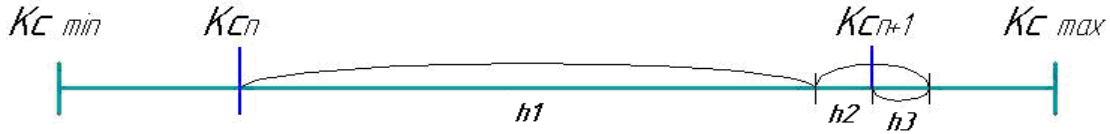


Рис. 2. Ідентифікація ММ з обраним напрямком в бік зростання настроювального коефіцієнта і компенсацією дистанції пошуку по НМ.

де $K_{c_{\min}}$, $K_{c_{\max}}$ – діапазон можливих значень настроювального коефіцієнта; K_{c_n} – попереднє відоме значення настроювального коефіцієнта; $K_{c_{n+1}}$ – нове значення настроювального коефіцієнта; h_1 – дистанція пошуку, яка компенсується нейронною мережею; h_2 , h_3 – кроки, які виконуються ітераційним пошуковим алгоритмом.

Для вирішення задачі була використана нейронна мережа, яка представляє собою тришаровий перцептрон з прихованим шаром (рис. 3).

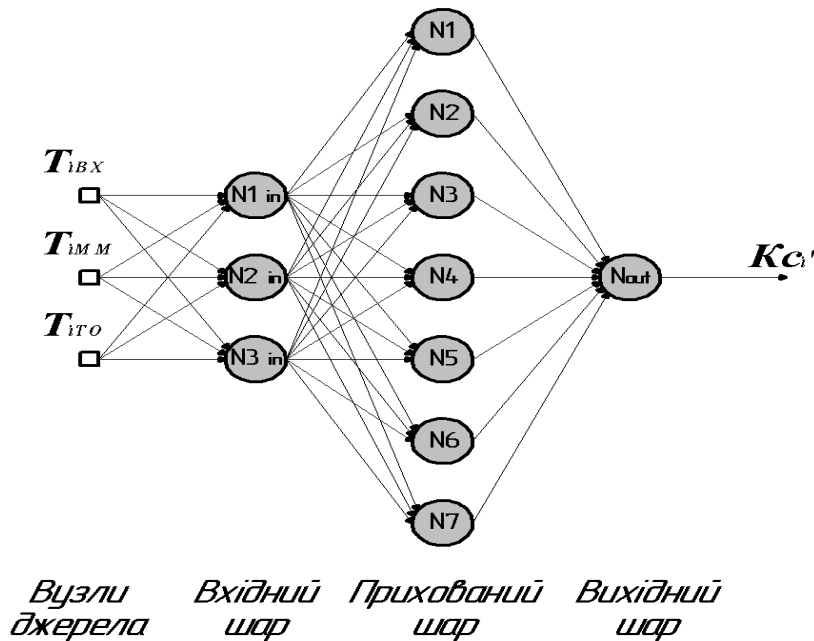


Рис. 3. Структура нейронної мережі

В процесі роботи алгоритму ідентифікації на вхід нейронної мережі надходять: T_{iBX} – температура суміші на вході i -го реактора; T_{iMM} – температура суміші на виході i -го реактора, яка розрахована за математичною моделлю; T_{iTO} – температура суміші на виході i -го реактора, яка отримана з технологічного об'єкта.

На виході нейронної мережі розраховується K_{c_i}' – приблизне значення настроювального коефіцієнта математичної моделі i -го реактора.

Для навчання нейронної мережі використовувався алгоритм зворотного поширення помилки. Оптимальна кількість нейронів в прихованому шарі визначалася експериментально і дорівнює семи. Подальше збільшення кількості нейронів не давало помітного підвищення точності розрахунку настроювального коефіцієнта, але значно збільшувало обсяг вихідних даних, необхідних для навчання мережі. В якості активаційної функції нейрона використаний сигмоїд, параметр якого дорівнює 0,92.

Розроблений алгоритм ітераційно-нейромережевої ідентифікації математичної моделі реакторного блоку каталітичного риформінгу наведений на рис. 4.

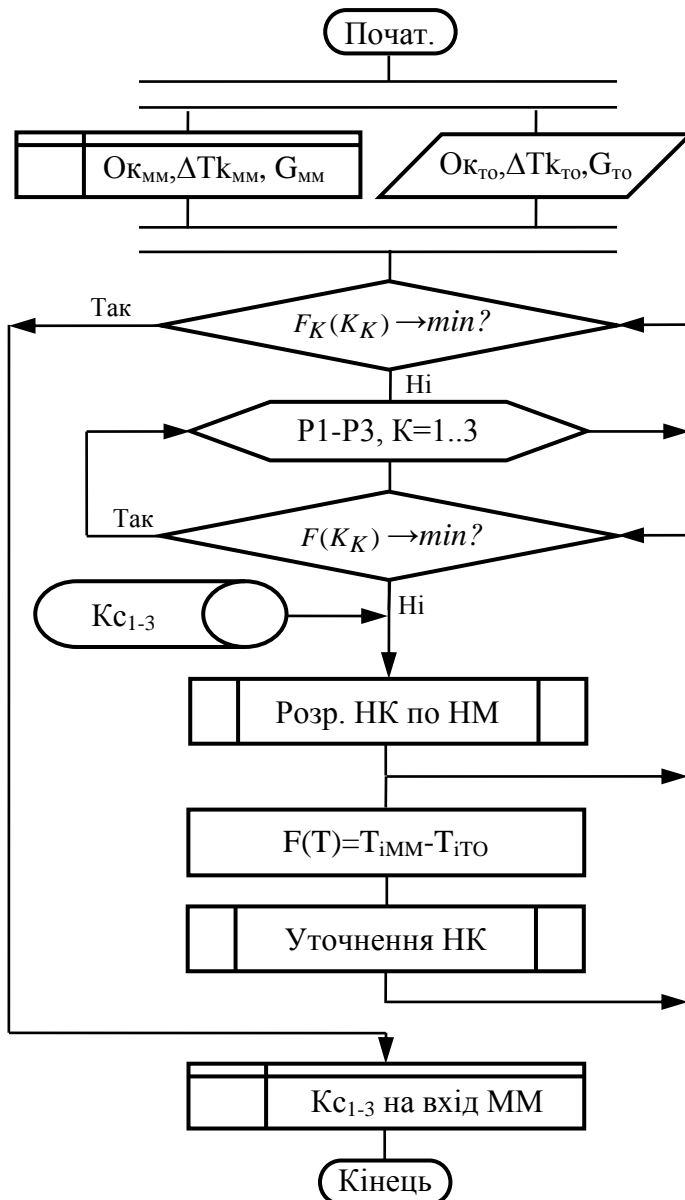


Рис. 4. Алгоритм ідентифікації ММ

порозрядного наближення з зміною напрямку пошуку. Напрямок пошуку коефіцієнта вибирається залежно від знака і значення функції різниці температур (3).

Для порівняльної оцінки запропонованого способу ідентифікації використовувалися експериментальні дані, отримані з установки каталітичного риформінгу Л35-11/300 Одеського НПЗ. Ці дані подавалися на вхід двох

На вхід алгоритму надходять дані, розраховані за математичною моделлю: вихід каталізата, його октанове число, температури суміші на входах і виходах реакторів. Також на вхід алгоритму надходять ці ж дані, але отримані з технологічного об'єкта.

У процесі ідентифікації здійснюється мінімізація функції помилок реакторного блоку $F_K(K_K)$, критерієм продовження ідентифікації служить порівняння помилки моделі з даними реального процесу. Якщо ідентифікація необхідна, починається циклічне уточнення коригуючих коефіцієнтів K_{c1} , K_{c2} , K_{c3} для трьох реакторів, починаючи з останнього до тих пір, поки не виконається умова мінімуму функції помилок окремого реактора $F(K_K)$. Стартове наближене значення настроювального коефіцієнта розраховується по нейронній мережі. У разі необхідності для подальшого уточнення коефіцієнта використовується ітераційний метод

математичних моделей, перша з яких працює зі стандартними настроювальними коефіцієнтами (СНК), отриманими з довідкової літератури, а друга з настроювальними коефіцієнтами, уточненими відповідно до розробленого способу ітераційно-нейромережевої ідентифікації (УНК).

Аналіз помилок моделі щодо виходу каталізата (рис. 5), збільшенню ароматичних вуглеводнів в реакційній суміші і перепаду температур в кожному реакторі показав меншу похибку за основними розрахунковими параметрами, при використанні розробленого способу ідентифікації.

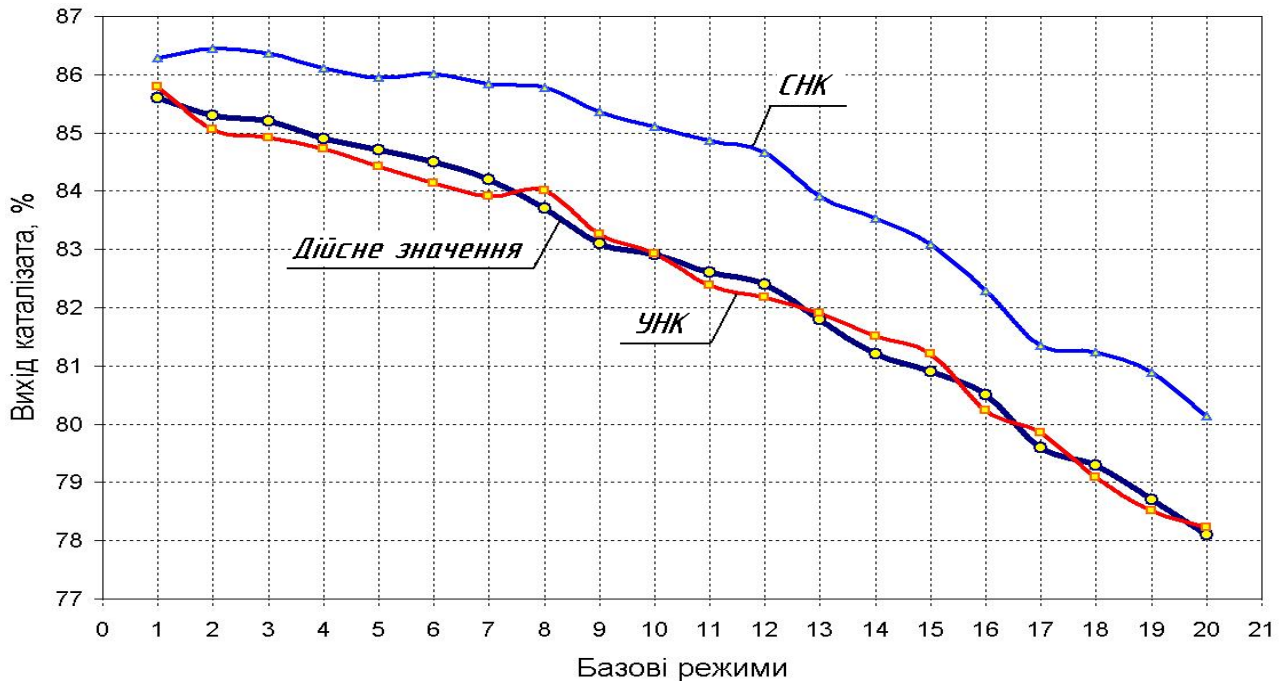


Рис. 5. Похибка математичної моделі процесу каталітичного риформінгу за виходом каталізата, $\lambda_{\text{СНК}} = 1,8\%$, $\lambda_{\text{УНК}} = 0,23\%$;

Для оцінки ефективності застосування нейронної мережі на етапі ідентифікації однакові вихідні дані подавалися на вхід двох математичних моделей окремих реакторів, перша з яких використовує метод ітерацій для пошуку настроювального коефіцієнта, друга - розроблений ітераційно-нейромережевий спосіб ідентифікації. Порівняльний аналіз показав, що при використанні нейронної мережі сумарна кількість ітерацій, необхідних для пошуку нового значення настроювального коефіцієнта, знизилася на 17 ... 34% при 300 навчальних прикладах і на 36 ... 77% при 800 навчальних прикладах для нейронної мережі.

Третій розділ присвячений оптимізації процесу каталітичного риформінгу на базі розробленої уточненої математичної моделі.

На підставі дослідження процесу каталітичного риформінгу за керуючі впливи при оптимальному керуванні обрані:

- температури реакційної суміші на вході в кожен реактор;
- витрата водневмісного газу (ВВГ) на вході реакторного блоку;

За математичною моделлю була досліджена чутливість процесу до вибраних керуючих впливів (рис. 6).

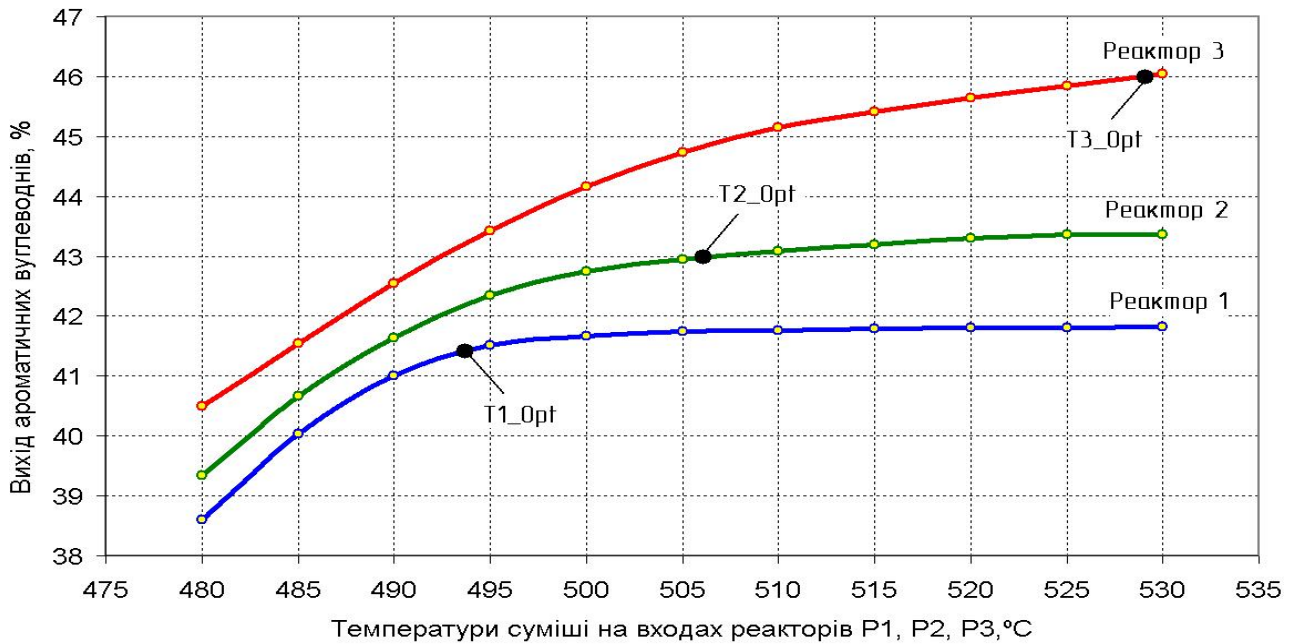


Рис. 6. Залежність виходу ароматичних вуглеводнів від температури для одного базового режиму

Аналіз отриманих залежностей на всіх досліджених базових режимах показав, що для кожного реактора каталітичного риформінгу існує деяке оптимальне (з точки зору ароматизації сировини) значення температури вхідної суміші (T_{Opt}), перевищення якого не дає помітного приросту виходу ароматичних вуглеводнів, проте збільшує швидкість дезактивації каталізатора.

Для розрахунку оптимального розподілу температур реакційної суміші на входах реакторів каталітичного риформінгу отримана наступна залежність:

$$Kg = 1 - \Delta Y_a^{\circ C} \quad (4)$$

де Kg – коефіцієнт жорсткості процесу, який вводиться в обмеження при рішенні задачі оптимального керування процесом і дозволяє визначити момент досягнення оптимального значення температури суміші на вході кожного реактора; $\Delta Y_a^{\circ C}$ – граничне збільшення виходу ароматичних вуглеводнів при зміні температури суміші на вході реактора на $1^{\circ C}$;

Коефіцієнт Kg змінюється в діапазоні $0 \dots 1$ і характеризує теоретичну максимальну жорсткість ведення процесу при $Kg=1$ і мінімальну жорсткість ведення процесу при $Kg=0$. В процесі роботи системи оптимального керування процесом каталітичного риформінгу, даний коефіцієнт вибирається і задається вручну оператором системи в залежності від необхідної жорсткості ведення процесу.

На підставі техніко-економічного аналізу функціонування установки каталітичного риформінгу Л35-11/300 Одеського НПЗ виконана постановка задачі оптимального керування процесом каталітичного риформінгу. Це завдання максимізації виходу каталізата при накладенні граничних обмежень на п'ять технологічних параметрів: температуру суміші на входи в реактори,

кратність циркуляції, октанове число, жорсткість ведення процесу і навантаження на реакторний блок:

$$\lambda(T_n^i, G_{vh}) \rightarrow \max \quad (5)$$

при обмеженнях:

$$\begin{aligned} T_{\min} < T_n^i < T_{\max}, i = 1, 3 \\ \eta_{h \min} < \eta_h < \eta_{h \max} \\ Ok = Ok_0 \\ Kg \leq Kg_0 \\ G_{0 \min} < G_0 < G_{0 \max} \end{aligned} \quad (6)$$

де $\lambda(T_n^i, G_{vh})$ - цільова функція виходу каталізата, максимізована на безлічі параметрів оптимізації; $T_n^i, T_{\min}, T_{\max}$ - вектор варійованих вхідних температур ($i=1...3$) і межі діапазону варіювання ($T_{\min}=457^\circ\text{C}$, $T_{\max}=530^\circ\text{C}$). Нижня межа визначається температурою запалювання каталізатора, а верхня його тепловою стійкістю:

$$\eta_h = \frac{G_{vh}}{G_0}, \eta_{h \min}, \eta_{h \max} \quad (7)$$

де $\eta_{h \min}, \eta_{h \max}$ - поточне і граничне значення кратності циркуляції (співвідношення ВВГ/сировина). η можна змінювати в широких межах, тому для кращої оцінки впливу на процес нижня межа цього параметра була знижена в порівнянні з регламентною ($\eta_{h \min}=1000$, $\eta_{h \max}=1800 \text{ Нм}^3/\text{м}^3$); G_{vh} - об'ємна витрата ВВГ на вході реакторного блоку, виступає в ролі варійованого параметра і обмежена межами зміни кратності циркуляції; Ok, Ok_0 - поточне і задане значення октанового числа; Kg, Kg_0 - поточне і задане значення коефіцієнта жорсткості процесу (4); $G_0, G_{0 \min}, G_{0 \max}$ - навантаження реакторного блоку за об'ємною витратою гідрогенізату, межі зміни цієї величини ($G_{0 \max}=120 \text{ м}^3/\text{ч}$).

Цільова функція в деяких точках має розриви викликані зміною кроку інтегрування при роботі алгоритму Рунге-Кутта-Мерсона, який використовується для вирішення систем диференціальних рівнянь, що описують кінетику хімічних перетворень і тепловий баланс у математичній моделі процесу. Тому для розв'язання задачі оптимізації використовувався метод Хука-Дживса. Алгоритм розрахунку оптимальних режимів процесу за математичною моделлю процесу каталітичного риформінгу наведений на рис. 7.

На вхід алгоритму оптимізації надходять наступні дані.

З технологічного об'єкта: T_1, T_2, T_3 - температури реакційної суміші на входах реакторного блоку; G_{vh} - об'ємна витрата ВВГ на вході реакторного блоку.

З математичної моделі: Ya_1, Ya_2, Ya_3 - прирощення ароматичних вуглеводнів в реакційній суміші на виходах реакторів; λ - прогнозований за

моделлю вихід каталізата; Ok – розраховане за моделлю октанове число риформату на виході реакторного блоку.

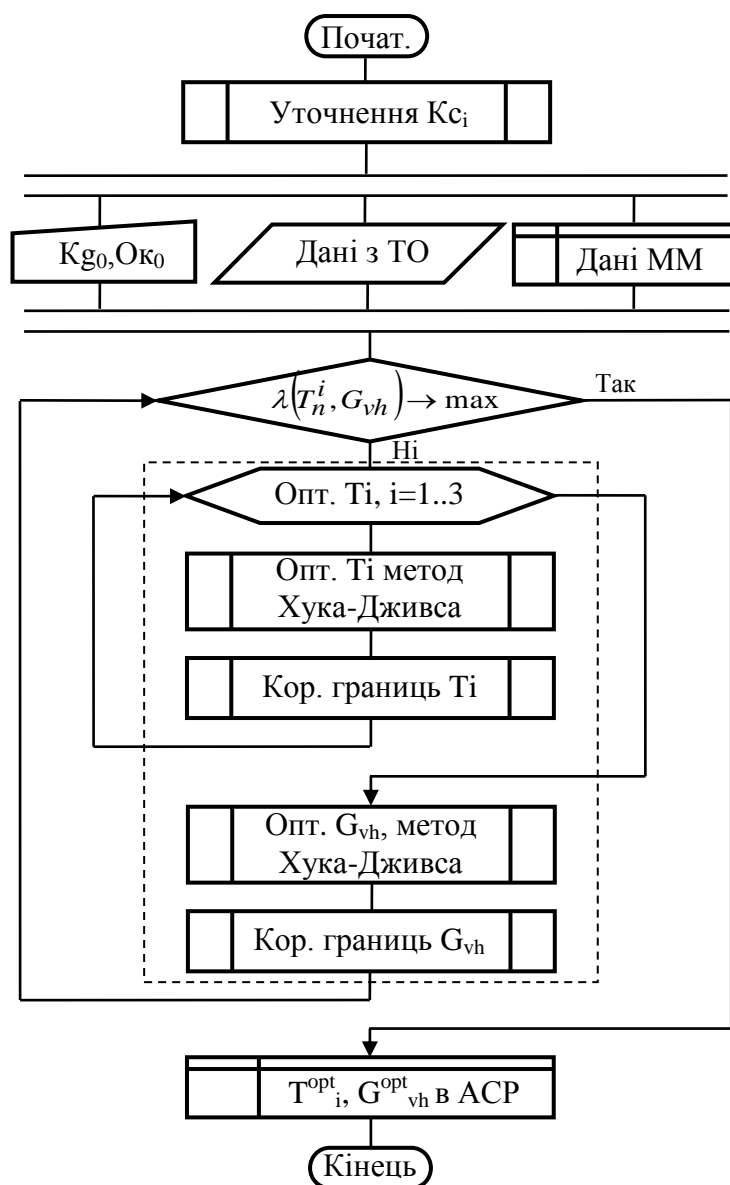


Рис. 7. Алгоритм розрахунку опт. режимів

Після закінчення циклу розрахунку оптимальних температур обчислюється значення витрати ВВГ, що забезпечує максимізацію виходу каталізата з урахуванням заданого обмеження за октановим числом.

Розраховані оптимальні значення температур суміші на входах реакторів і витрати ВВГ передаються в підсистему автоматичного регулювання АСР, в якості завдань реалізованим там регуляторам.

Проведене дослідження оптимальних режимів показало, що підвищення вмісту ароматичних вуглеводнів в сировині призводить до більшого зростання виходу каталізата, ніж при підвищенні частки нафтових. У всіх досліджених оптимальних режимах температура входу третього реактора досягала верхнього обмеження, а значення кратності циркуляції лежало на нижній межі діапазону варіювання. Це дозволяє зробити висновок про можливість оптимального

3 АРМ оператора задається: Kg_0 – коефіцієнт жорсткості ведення процесу; Ok_0 – обмеження за октановим числом.

В якості налаштувань на вхід алгоритму оптимізації також передаються вектора, що описують верхні та нижні межі змінних, що оптимізуються.

Для мінімізації помилки розрахунку оптимальних режимів перед введенням вихідних даних алгоритм оптимізації ініціює уточнення настроювальних коефіцієнтів Kc , що враховують активність каталізатора в математичній моделі. Після чого циклічно для кожного реактора починає розраховуватися температура реакційної суміші на вході, яка забезпечує максимальне, з урахуванням обмежень, прирощення ароматичних вуглеводнів на виході реактора. Для цього використовується метод Хука-Дживса, доповнений підпрограмою контролю кордонів варійованих параметрів

керування процесом каталітичного риформінгу тільки за двома параметрами T_1 і T_2 , при постійному граничному значенні решти.

Порівняння показників базових і оптимальних режимів процесу каталітичного риформінгу розрахованих запропонованим способом, наведені на рис. 8.

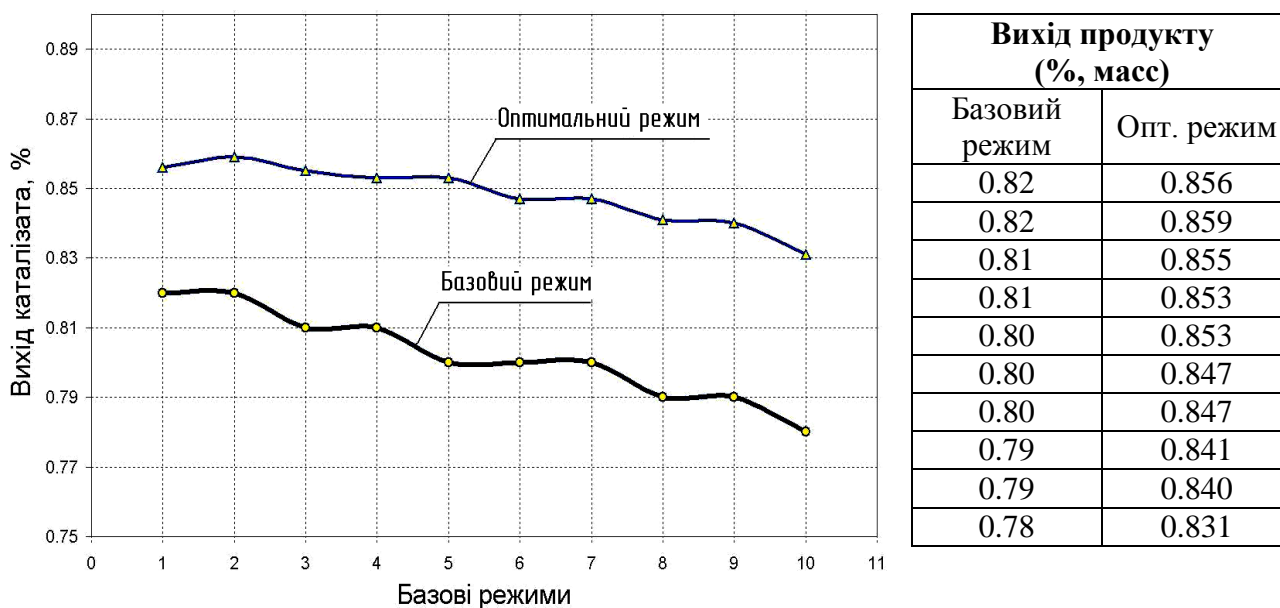


Рис. 8. Порівняння базових і оптимальних режимів процесу каталітичного риформінгу

На підставі дослідження оптимальних режимів, розроблено спосіб оптимального керування процесом каталітичного риформінгу, шляхом оптимального розподілу температур на входах першого і другого реакторів, при постійному граничному значенні решти керуючих впливів.

Як впливає з отриманих даних, оптимізація базового режиму за керуючими величинами запропонованим способом, дає збільшення виходу каталізата в середньому на 3-5% для всіх досліджених базових режимів.

Також в даному розділі розроблена дворівнева функціональна структура і технічна реалізація системи оптимального керування процесом каталітичного риформінгу на основі програмованого логічного контролера Simatic S7-400.

Розроблений спосіб розрахунку оптимальних режимів на базі уточненої математичної моделі, алгоритм і система оптимального керування, побудована на його основі, пройшли дослідно-промислові випробування і передані в експлуатацію на ПАТ «ЛУКОЙЛ-Одеський НПЗ», що підтверджено відповідним актом.

Четвертий розділ присвячений розробці комплексу програм «Математичне моделювання та оптимізація процесу каталітичного риформінгу», який містить чисельну реалізацію методів і алгоритмів розроблених в розділах 2 і 3 дисертаційної роботи.

Базовим засобом розробки програмного комплексу є мова програмування високого рівня Borland Delphi 5.0. Комплекс має модульну структуру (рис. 9), окремі модулі після компіляції підключаються до графічного інтерфейсу у вигляді зовнішніх бібліотек.

Стрілками на рис. 9 показано наявність та напрямок інформаційного обміну між окремими модулями програмного комплексу.

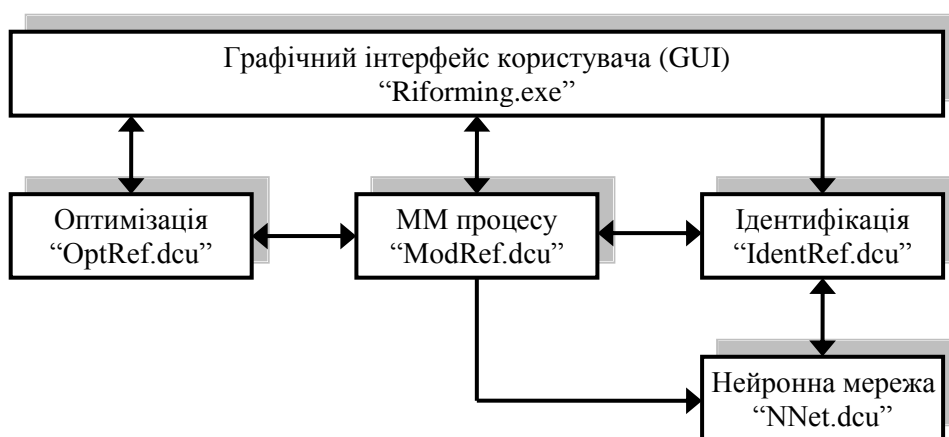


Рис. 9. Структура програмного комплексу «Математичне моделювання та оптимізація процесу каталітичного риформінгу»

Для створення, конфігурування, дослідження та налагодження нейронної мережі на початковому етапі використовувався вільно поширюваний програмний емулятор нейрокомп'ютера Neural Network Wizard (NNW) компанії «BaseGroup Labs». Подальше використання і налаштування нейронної мережі здійснювалося засобами бібліотеки компонентів NeuralBase.

Також в даному розділі сформульовані основні підходи інтеграції програмного комплексу «Математичне моделювання та оптимізація процесу каталітичного риформінгу» в сучасні SCADA системи.

ВИСНОВКИ

Дисертація є завершеною працею, в якій вирішена актуальна наукова задача розробки та дослідження системи оптимального керування процесом каталітичного риформінгу на базі математичної моделі для збільшення його продуктивності. Зазначений результат досягається шляхом введення в рівняння для розрахунку констант швидкостей хімічних реакцій коригувальних множників, які компенсують різну активність каталізатора в реакторах і таким чином збільшують адекватність математичної моделі каталітичного риформінгу, а також за рахунок оптимального розподілу температур на входах реакторного блоку в залежності від чутливості каналів керування "вихід ароматичних вуглеводнів - температура суміші на вході" реакторів. За результатами досліджень сформульовані наступні висновки:

1. В результаті аналізу відомих способів оптимального керування процесом каталітичного риформінгу встановлено, що математичні моделі, які використовуються в системах керування, не забезпечують високої точності розрахунку оптимальних режимів процесу, тому що не враховують особливості перетворення реакційної суміші в окремих реакторах реакторного блоку і не мають ефективного механізму компенсації нестационарності процесу внаслідок зміни активності каталізатора з плином часу.

2. Розроблена уточнена математична модель реакторного блоку каталітичного риформінгу, яка описує процес у вигляді системи з трьох послідовно з'єднаних кінетичних моделей окремих реакторів з індивідуальними настроювальними коефіцієнтами. Отримана модель враховує особливості хімічних перетворень реакційної суміші в кожному реакторі реакторного блоку і в результаті дає меншу похибку за основними розрахунковими показниками в порівнянні з відомими аналогами.

3. Для компенсації нестационарності процесу каталітичного риформінгу внаслідок зміни активності каталізатора протягом часу в рівняння для розрахунку констант швидкостей найбільш чутливих до стану каталізатора реакцій введені додаткові коригувальні коефіцієнти, що уточнюються на етапі ідентифікації математичної моделі.

4. Розроблено ітераційно-нейромережевий спосіб ідентифікації математичної моделі процесу каталітичного риформінгу, який дозволяє мінімізувати час пошуку настроювальних коефіцієнтів. Нейронна мережа використовується для зменшення кількості кроків пошукового алгоритму, а точне значення настроювального коефіцієнта визначається методом ітерацій, при чому крок і напрям пошуку вибирається в залежності від знака і значення функції перепаду температур реакційної суміші в кожному реакторі. Експериментальна перевірка ефективності запропонованого способу ідентифікації показала зниження загального часу пошуку настроювальних коефіцієнтів моделі більш ніж на 70%.

5. Розроблено алгоритми для розрахунку уточненої математичної моделі, а також ідентифікації математичної моделі каталітичного риформінгу ітераційно-нейромережевим способом.

6. Здійснена постановка задачі оптимального керування процесом каталітичного риформінгу на підставі техніко-економічного аналізу функціонування установки каталітичного риформінгу Л35-11/300 Одеського НПЗ. Розроблено спосіб розв'язання завдання оптимізації процесу каталітичного риформінгу на основі методу Хука-Дживса, доповненого процедурою перевірки обмежень.

7. Методами імітаційного моделювання досліджена чутливість вихідних показників процесу (вихід каталізата і ароматизація суміші) до керуючих впливів. Розроблено спосіб і алгоритм розрахунку оптимального розподілу температур реакційної суміші на входах реакторів каталітичного риформінгу в залежності від ароматизації сировини і чутливості процесу по каналу керування температурою.

8. Проведено дослідження оптимальних режимів процесу. Розроблено спосіб керування процесом каталітичного риформінгу шляхом оптимального розподілу температур на входах першого і другого реакторів при постійному граничному значенні решти керуючих впливів.

9. Розроблена дворівнева функціональна структура і технічна реалізація розробленої системи оптимального керування процесом каталітичного риформінгу на основі програмованого логічного контролера Simatic S7-400.

10. Розроблено комплекс програм «Математичне моделювання та оптимізація процесу каталітичного риформінгу». Комплекс містить чисельну реалізацію методів і алгоритмів, представлених в даній роботі. В основу комплексу покладено модульний принцип виконання.

11. Розроблено основні підходи інтеграції програмного комплексу «Математичне моделювання та оптимізація процесу каталітичного риформінгу» в сучасні SCADA системи.

12. Розроблена система оптимального керування процесом каталітичного риформінгу на базі уточненої кінетичної моделі пройшла дослідно-промислові випробування і передана в експлуатацію (у складі математичного, алгоритмічного та програмного забезпечення) на ПАТ «ЛУКОЙЛ - Одеський НПЗ», що підтверджено відповідним актом. За результатами випробувань встановлено, що використання запропонованої системи оптимального керування збільшує вихід кінцевого продукту (каталізата) і його октанову характеристику на 3-5%.

Основні положення та результати дисертації наведені у публікаціях:

1. Левчук И.Л. Адаптивная оптимизация процесса платформинга. /И.Л. Левчук, В.Я. Тришкин, Г.И. Манко // Вопросы химии и химической технологии. – 2001. – № 3. – С. 123 – 126.

2. Левчук И.Л. Оптимизация процесса платформинга высокооктановых бензинов. /И.Л. Левчук, В.Я. Тришкин // Сборник научных трудов национальной горной академии Украины. – 2001. – №11. Т. 2. – С. 139-144.

3. Левчук И.Л. Идентификация математической модели блока реакторов каталитического риформинга с использованием информационной оценки точности моделирования. /В.Я. Тришкин, Г.И. Манко, В.И. Пинский, И.Л. Левчук // Автоматика, Автоматизация, Электротехнические комплексы и системы. – Херсон. – 2001. – № 1(8). – С. 12-15.

4. Левчук И.Л. Оптимальное управление процессом платформинга. / В.Я. Тришкин, И.Л. Левчук, О.П. Мысов, А.А. Ковбык // Вопросы химии и химической технологии. – 2002. – № 2. – С. 113 – 118.

5. Левчук И.Л. Идентификация параметров математической модели динамики двухёмкостных объектов управления. /С.Д. Блонский, И.Л. Левчук, А.Ф. Шуть // Вопросы химии и химической технологии. – 2004. – № 4. – С. 203-205.

6. Левчук И.Л. Разработка математической модели процесса каталитического риформинга в каскаде реакторов / И.Л. Левчук // Збірник наукових праць НГУ. – 2012. – №39. – С. 122 – 127.

7. Левчук И.Л. Идентификация математической модели процесса каталитического риформинга на базе нейросетевых технологий / И.Л. Левчук // Математичне моделювання. – Дніпродзержинськ. – 2012. – №2. –С. 77-80.

8. Левчук И.Л. Разработка и идентификация уточненной математической модели процесса каталитического риформинга / И.Л. Левчук // Науковий вісник НГУ, 2013. – №2.– С. 79–85.

9. Спосіб керування процесом каталітичного риформінгу: Пат. 57336 А; Україна МПК 7 C10G35/24, G05D27/00 / Левчук І.Л., Тришкін В.Я., Ковбик А.А. – №2002086958; Заявл. 23.08.02; Опубл. 16.06.03; Бюл. № 6. – 10 с.

10. Левчук И.Л. Моделирование и оптимальное управление процессом каталитического риформинга / И.Л. Левчук, В.Я. Тришкин // I Міжнародна науково-технічна конференція студентів і аспірантів «Хімія і сучасні технології», 26-28 травня 2003 р. Дніпропетровськ. : тези допов. – Дніпропетровськ, 2003. – С 223-224.

11. Левчук І.Л. Комп'ютерне моделювання и оптимізація процесів хімічної технології. / І.Л. Левчук, Д.А. Лосіхін, О.В. Білоброва, О.Ф. Шуть, В.Я. Тришкін // 11 Міжнародна науково-технічна конференція «Системний аналіз та інформаційні технології», Національний технічний університет України, «КПІ», 26-30 травня 2009 р. Київ. : тези допов. – Київ, 2009. – С 338.

Особистий внесок здобувача в публікаціях:

У роботах, написаних у співавторстві дисертанту належать: у роботі [1] розробка методики адаптивної оптимізації процесу платформінгу з використанням системно-інформаційного аналізу; [2] формулювання основних положень математичного та економічного аналізу процесу с точки зору оптимального керування, а також математична постановка задачі оптимізації; [3] запропонована методика ідентифікації математичної моделі блока реакторів каталітичного риформінгу, яка використовує універсальну інформаційну оцінку точності моделювання; [4] обраний критерій і метод оптимізації, на підставі отриманих експериментальних даних проведено дослідження оптимальних режимів процесу платформінгу; [5] запропоновано метод ідентифікації параметрів математичних моделей та розроблено програмне забезпечення для його реалізації; [9] ідея і обґрунтування способу оптимального керування. [10] ідея, критерій і метод оптимізації; [11] дослідження і розробка алгоритмів та програм;

АНОТАЦІЯ

Левчук І.Л. Оптимальне керування процесом каталітичного риформінгу при отриманні високооктанового компонента бензину. - На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.07 – «Автоматизація процесів керування». – Державний ВНЗ «Національний гірничий університет», Дніпропетровськ, 2013.

У дисертаційній роботі представлено вирішення актуальної наукової задачі створення та реалізації системи оптимального керування процесом каталітичного риформінгу на базі уточненої математичної моделі для збільшення його продуктивності.

Розроблена уточнена математична модель реакторного блоку каталітичного риформінгу, яка враховує особливості перетворення реакційної суміші, а також зміну активності каталізатора з плином часу в кожному реакторі і в результаті має меншу похибку за основними розрахунковими

показниками. Розроблений ітераційно-нейромережевий спосіб ідентифікації математичної моделі, що дозволяє мінімізувати час пошуку настроювальних коефіцієнтів.

Запропоновано спосіб розрахунку оптимального розподілу температур реакційної суміші на входах реакторів каталітичного риформінгу в залежності від ароматизації сировини і чутливості процесу по каналу керування температурою. Розроблена функціональна структура і технічна реалізація дворівневої системи оптимального керування на базі математичної моделі.

Створено комплекс програм «Математичне моделювання та оптимізація процесу каталітичного риформінгу», що містить чисельну реалізацію методів і алгоритмів, представлених у роботі.

Ключові слова: каталітичний риформінг, математична модель, ідентифікація, оптимальне керування.

АННОТАЦИЯ

Левчук И.Л. Оптимальное управление процессом каталитического риформинга при получении высокооктанового компонента бензина. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.07 – «Автоматизация процессов управления». – Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет», Днепропетровск, 2013.

В диссертационной работе представлено решение актуальной научной задачи создания и реализации системы оптимального управления процессом каталитического риформинга на базе уточненной математической модели для увеличения его производительности.

Анализ существующих способов математического моделирования и оптимального управления процессом каталитического риформинга показал, что известные математические модели не обеспечивают высокую точность расчета оптимальных режимов процесса. Это снижает общую эффективность управления и технико-экономические показатели каталитического риформинга.

Разработана уточненная математическая модель реакторного блока каталитического риформинга, описывающая процесс в виде системы последовательно соединенных моделей отдельных реакторов с индивидуальными настроечными коэффициентами. Для компенсации нестационарности процесса каталитического риформинга в результате дезактивации катализатора с течением времени, в уравнения для расчета констант скоростей наиболее чувствительных к состоянию катализатора реакций введены дополнительные корректирующие коэффициенты, которые уточняются на этапе идентификации математической модели. Получена модифицированная функция ошибок математической модели, позволяющая минимизировать ошибку модели каждого реактора, а также всего реакторного блока в целом.

Разработанная модель учитывает особенности превращений реакционной смеси, а также изменение активности катализатора с течением времени в каждом реакторе каталитического риформинга и в результате дает меньшую ошибку по основным расчетным показателям в сравнении с известными аналогами.

Разработан итерационно-нейросетевой способ идентификации математической модели процесса каталитического риформинга, позволяющий минимизировать время поиска настроечных коэффициентов. При этом нейронная сеть используется для уменьшения количества шагов поискового алгоритма, а точное значение настроечного коэффициента определяется методом поразрядного приближения с изменением направления поиска, причем шаг и направление поиска выбирается в зависимости от знака и значения функции перепада температур реакционной смеси в каждом реакторе.

Разработаны алгоритмы для расчета уточненной математической модели, а также идентификации математической модели каталитического риформинга итерационно-нейросетевым способом.

Осуществлена постановка задачи оптимального управления процессом каталитического риформинга на основании технико-экономического анализа функционирования установки каталитического риформинга Одесского НПЗ. Выбраны управляющие воздействия и разработан способ решения задачи оптимизации процесса каталитического риформинга на основе метода нелинейной оптимизации Хука-Дживса, дополненного процедурой проверки ограничений.

Методами имитационного моделирования исследована чувствительность выходных показателей процесса к выбранным управляющим воздействиям. Предложен способ расчета оптимального распределения температур реакционной смеси на входах реакторов каталитического риформинга в зависимости от ароматизации сырья и чувствительности процесса по каналу управления температурой.

На основании исследования оптимальных режимов разработан способ и алгоритм оптимального управления, обеспечивающий наибольшую производительность процесса каталитического риформинга путем оптимального распределения температур на входах первого и второго реакторов при постоянном предельном значении остальных управляющих воздействий.

Разработана двухуровневая функциональная структура и техническая реализация разработанной системы оптимального управления процессом каталитического риформинга на основе программируемого логического контроллера Simatic S7-400.

Создан комплекс программ «Математическое моделирование и оптимизация процесса каталитического риформинга», содержащий численную реализацию методов и алгоритмов, представленных в работе. Разработаны подходы интеграции данного комплекса в современные SCADA системы.

Разработанная система оптимального управления процессом каталитического риформинга на базе уточненной кинетической модели прошла

опытно-промышленные испытания и передана в эксплуатацию (в составе математического, алгоритмического и программного обеспечения) на ОАО «ЛУКОЙЛ - Одесский НПЗ», что подтверждено соответствующим актом. По результатам испытаний установлено, что использование предложенной системы оптимального управления увеличивает выход конечного продукта (катализата) и его октановую характеристику на 3-5%.

Ключевые слова: каталитический риформинг, математическая модель, идентификация, оптимальное управление.

ABSTRACT

Levchuk I.L. Optimal control of the catalytic reforming unit for production of high octane gasoline component. – On the right of manuscript.

Dissertation for the degree of candidate of technical sciences in the speciality 05.13.07 «Process Control Automation». – State institution of higher education «National Mining University», Dnepropetrovsk, 2013.

The dissertation offers a solution to the pressing problem of the catalytic reforming unit performance improvement through the creation and implementation of optimal control system based on the updated kinetic model.

The updated mathematical model of catalytic reforming reactor unit has been developed. It describes the process in the form of series-connected models of separate reactors with individual tuning coefficients. The obtained model takes into account time changes in the activity of the catalyst in each reactor and it shows reduce of the error in the basic estimate indicators. The iterative neural-network method of the catalytic reforming mathematical model identification has been developed. It allows us to minimize the tuning coefficients search time.

We have suggested the method of calculation of the optimal temperature distribution in the reaction mixture at the inlet of the catalytic reforming reactor depending on the aromatization of raw materials and the sensitivity of the process by the temperature control channel. The functional structure and the technical implementation of the two-level optimal control system based on the mathematical models have been presented.

The software system “Mathematical Modeling and Catalytic Reforming Optimization” containing the numerical implementation of the methods and algorithms presented in the paper have been created.

Keywords: catalytic reforming, mathematical model, identification, optimal control.

Левчук Ігор Леонідович

**ОПТИМАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ КАТАЛІТИЧНОГО
РИФОРМІНГУ ПРИ ОТРИМАННІ ВИСОКООКТАНОВОГО
КОМПОНЕНТА БЕНЗИНУ**

(Автореферат)

Підп. до друку 31.07.2013 р. Формат 60x90/16
Папір офсет. Ризографія. Ум. друк. арк. 0,9.
Обл.-вид. арк. 0,9. Тираж 120 пр. Зам. № 197.

Державний ВНЗ
«Національний гірничий університет»
49027, м. Дніпропетровськ, просп. К. Маркса, 19